УДК 628.853:697.934 https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-3-2-12

Анализ энергетической эффективности способов осушения воздуха, определяющих безопасные микроклиматичекие условия труда

В. В. Дерюшев, Е. Е. Косенко, В. В. Косенко, М. А. Кривчук, И. В. Дерюшев, А. С. Тимофеев
Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Статья посвящена вопросам обеспечения необходимых для безопасной эксплуатации различных технических объектов параметров влажности воздуха.
Постановка задачи. Рассмотрены аналитические методы оценки энергетической эффективности адсорбционного и конденсационного способов осушения воздуха, обеспечивающих безопасные микроклиматические условия труда, и влияние режимов работы осушительных установок на параметры микроклимата.
*Теоретическая часть***.** В качестве показателей энергетической эффективности каждого из способов предложено использовать энергетические затраты, минимально необходимые для осуществления идеальных физических процессов осушения и приходящиеся на единицу массы удаляемых из воздуха водяных паров. Это обеспечивает безопасные и комфортные микроклиматические условия труда с минимальными энергетическими затратами. Отношение удельных энергетических затрат конденсационного и адсорбционного способов показывает их сравнительную эффективность. Для определения параметров воздуха в реализуемых процессах осушения (охлаждения, конденсации и адсорбции водяных паров) использовалась электронная Id-диаграмма.
Выводы. Получены аналитические зависимости для анализируемых показателей энергетической эффективности, обеспечивающие безопасные и комфортные микроклиматические условия труда с минимальными энергетическими затратами. Числовые оценки проводились по наиболее вероятным режимам процессов осушения и параметрам воздуха. Обоснованы параметрические ограничения на реализацию адсорбционного способа осушения, при которых он становится энергетически более выгодным. Определены условия, при которых возможна реализация комбинированного способа осушения для обеспечения безопасных микроклиматических условий труда.

Ключевые слова: безопасные микроклиматические условия труда, осушение воздуха, влагосодержание, энтальпия, энергетическая эффективность.

Для цитирования: Анализ энергетической эффективности способов осушения воздуха, определяющих безопасные микроклиматичекие условия труда / В. В. Дерюшев, Е. Е. Косенко, В. В. Косенко [и др.] // Безопасность техногенных и природных систем. — 2021. — № 3. — С. 2−12. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-3-2-12

Energy efficiency analysis of air dehumidification methods that determine safe microclimatic working conditions

V. V. Deryushev, E. E. Kosenko, V. V. Kosenko, M. A. Krivchuk, I. V. Deryushev, A. S. Timofeev
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The article deals with the issues related to provision of air humidity parameters required for non-hazardous operation of various technical facilities.
Problem Statement. The paper considers analytical methods for energy efficiency assessment of adsorption and condensation methods of air dehumidification, which provide safe microclimatic working conditions, and the influence of the operating modes of dehumidifying plants on the parameters of the microclimate.
Theoretical Part. As indicators of the energy efficiency of each of the methods, it is proposed to use the energy costs that are minimally necessary for the implementation of ideal physical dehumidification processes and per unit mass of water units emitted from air. This ensures safe and comfortable microclimatic working conditions with minimal energy costs. The ratio of the specific energy costs of the condensation and adsorption methods shows their comparative efficiency. An electronic Id-diagram was used to determine the air parameters in the implemented dehumidification processes (cooling, condensation and adsorption of water vapor).
Conclusion. Analytical dependences are obtained for the analyzed energy efficiency indicators that provide safe and comfortable microclimatic working conditions with minimal energy costs. Numerical estimates were carried out according to the most probable modes of dehumidification processes and air parameters. The parametric restrictions on

the implementation of the adsorption dehumidification method are justified, in which it becomes energetically more profitable. The conditions under which it is possible to implement a combined dehumidification method to ensure safe microclimatic working conditions are determined.

Keywords: safe microclimatic working conditions, air dehumidification, moisture content, enthalpy, energy efficiency.

For citation: V. V. Deryushev, E. E. Kosenko, V. V. Kosenko, M. A. Kryvchuk, I. V. Deryushev, A. S. Timofeev. Energy efficiency analysis of air dehumidification methods that determine safe microclimatic working conditions. Safety of Technogenic and Natural Systems. 2021;3: 2–12. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-3-2-12

Введение. Одной из основных задач, решаемых при обеспечении безопасности эксплуатации различных технических объектов, является соблюдение задаваемых нормативной документацией температурно-влажностных (микроклиматических) параметров воздушной среды снаружи и внутри объекта [1]. В первую очередь это относится к параметрам влажности воздуха внутри объекта. Повышенная влажность относится к вредным производственным факторам и, в определенных случаях, может вызвать выпадение конденсата на различных поверхностях, возникновение коррозии металлов [2], повреждение электронных элементов и другие нежелательные последствия. В этом случае повышенная влажность становится опасным производственным фактором. Например, запотевание стекол транспортного средства увеличивает риск дорожно-транспортного происшествия. Появление конденсата внутри цистерн и сосудов высокого давления и последующая коррозия могут привести к их взрывному разрушению. Поэтому параметры влажности, определяющие безопасные условия труда, подлежат постоянному мониторингу и контролю при эксплуатации и хранении технических объектов, что также обеспечивает на достаточном уровне интегральные показатели их качества и надежности [3]. Наиболее часто происходит превышение установленных параметров влажности внутри эксплуатируемых объектов в результате протекания технологических процессов, выпадения конденсата из воздуха, осадков, потери герметичности систем водоснабжения, затоплений и других природных и техногенных воздействий на объект. Это вызывает необходимость осушения воздуха для решения технологических задач и задач обеспечения безопасных микроклиматических условий труда практически во всех отраслях экономики страны, особенно в системах вентиляции различных подземных сооружений, «чистых зон» предприятий микроэлектроники, при хранении продукции сельского хозяйства [4–7]. В настоящее время с целью приведения параметров влажности внутри объектов к нормированным значениям используются различные осушительные установки.

Энергетическая эффективность процессов обработки воздуха в системах кондиционирования в настоящее время обеспечивается множеством способов и различных мероприятий [8–10], но на практике выбор энергетически эффективных решений, особенно для процессов осушения воздуха, очень сложен из-за влияния многочисленных факторов. Вопросы повышения энергетической эффективности процессов осушения для различных способов и схем рассмотрены достаточно подробно в работах [11–14]. Однако сравнительные оценки эффективности для различных способов при одинаковых условиях реализации этих процессов в них отсутствуют. Поэтому формулировка критериев энергетической эффективности и получение числовых значений для различных вариантов реализации процессов осушения воздуха, определяющих безопасные микроклиматические условия труда, является актуальной научной задачей. При этом необходимо учитывать, что наиболее эффективные промышленные осушители воздуха построены на адсорбционном и конденсационном способах осушения воздуха [15].

Постановка задачи. Рассмотрим энергетическую эффективность адсорбционного и конденсационного способов путем определения минимально необходимых затрат энергии на реализацию идеальных термодинамических процессов осушения некоторого объема воздуха, масса сухой части которого m = 1 кг. При этом задаются одинаковые конечные значения влагосодержания, определяемые требованиями безопасности, и одинаковые для обоих способов начальные состояния воздуха перед осушением.

Следует отметить, что существенное влияние на эффективность процесса уменьшения влажности в помещении для обеспечения безопасных микроклиматических условий труда оказывает не температура подаваемого внутрь воздуха, а его влагосодержание, т.е. количество паров воды, приходящееся на один килограмм сухого воздуха, что следует из термодинамического анализа процессов [14–15]. Кроме того, реальные затраты энергии в осушителях, реализующих рассматриваемые способы, могут быть значительно выше из-за потерь, неизбежно возникающих в действительных процессах, в отличие от идеальных термодинамических процессов, рассматриваемых в данном исследовании.

Основными идеальными термодинамическими процессами при адсорбционном способе осушения воздуха являются процессы конденсации паров воды на охлаждающей поверхности воздухоохладителя, когда

ее температура становится ниже температуры точки росы осушаемого воздуха. Температура точки росы t_p при известном барометрическом давлении (или давлении сжатого воздуха) p однозначно связана с влагосодержанием воздуха в состоянии насыщения $d_н$. Это следует из того, что влагосодержание $d_н$, в свою очередь, однозначно зависит от парциального давления насыщенного водяного пара $p_н$ [14]:

$$d_н = 622 \cdot p_н/(p - p_н). \quad (1)$$

Зависимость парциального давления насыщенного водяного пара $p_н$ от температуры $p_н = f(t)$ устанавливается по таблицам термодинамического состояния влажного воздуха. Следовательно, при охлаждении воздуха, когда его температура достигает значения, определяемого из уравнения (1), в воздухе начинается конденсация водяного пара и эта температура называется температурой точки росы. Неконтролируемая конденсация водяного пара, как уже отмечалось, является опасным производственным фактором, и температуру точки росы необходимо снижать. Так как давление насыщенного водяного пара $p_н$ уменьшается с понижением температуры, то, следовательно, чем ниже температура точки росы воздуха, тем ниже его влагосодержание. Поэтому для получения более сухого воздуха с низким влагосодержанием необходимо понижать температуру охлаждающей поверхности.

Затраты энергии на реализацию процесса охлаждения воздуха являются основными при конденсационном способе осушения, но не единственными. Если температура охлаждающей поверхности меньше 0°С, то выпадающий на ней конденсат замерзает. Это требует дополнительного количества энергии. Кроме того, при большой длительности процесса осушения необходимо учитывать затраты энергии на процесс оттаивания воздухоохладителя.

Основными физическими процессами при адсорбционном способе осушения являются процессы адсорбции водяных паров из воздуха при пропускании его через специальные вещества — адсорбенты. Наиболее распространенным адсорбентом в современных осушителях воздуха являются гранулированный силикагель, представляющий собой материал с высокой удельной поверхностью (до 800 $м^2/г$) и большим объемом сорбционных пор. Это обусловливает достаточно высокую адсорбционную способность силикагеля, которая доходит до 30 % по массе [15]. Процесс адсорбции водяных паров при пропускании воздуха через адсорбент теоретически осуществляется без подвода или отвода теплоты. В этом случае энтальпия воздуха остается постоянной, что не требует энергетических затрат. Однако для восстановления поглотительной способности силикагеля при эксплуатации осушителей воздуха необходимо периодическое осуществление процессов регенерации его свойств путем нагревания до температуры 200–250°С или прокаливанием при температуре 700–800°С [14]. Данные процессы требуют существенных энергетических затрат.

Таким образом, основными физическими процессами, связанными с энергетическими затратами при конденсационном способе осушения воздуха, являются процессы охлаждения воздуха с конденсацией водяных паров, а также процессы намерзания льда и оттаивания обледенелых поверхностей воздухоохладителей при необходимости осушения воздуха до отрицательных значений температуры точки росы. При адсорбционном способе осушения воздуха такими процессами являются процессы десорбции водяных паров из адсорбентов, осуществляемые путем нагревания или прокаливания последних.

Для анализа энергетических затрат в рассматриваемых процессах воспользуемся Id-диаграммой влажного воздуха [15].

Теоретическая часть. Идеальные процессы адсорбционного осушения и охлаждения воздуха с образованием конденсата, сопровождающегося уменьшением влагосодержания, на Id-диаграмме имеют вид, показанный на рис. 1 (процессы ВК, АВ и ВС).

Каждой из точек, обозначающих начальные и конечные состояния воздуха в рассматриваемых процессах, соответствуют определенные значения параметров [14]: температуры t,°С, относительной влажности φ,%, влагосодержания d, г/кг с.в. (грамм водяных паров на килограмм сухого воздуха), температуры точки росы t, °С, энтальпии (теплосодержания) I, кДж/кг с.в. Начальное состояние воздуха (точка А на рис. 1) задается, как правило, по температуре t_A и относительной влажности φ_A. Остальные параметры определяются с помощью графической или электронной Id-диаграммы. Конечное состояние воздуха после охлаждения при постоянном влагосодержании до начала конденсации (точка росы для воздуха состояния А — точка В на рис. 1), определяется как точка пересечения линии $\varphi = 100$ % и линии $d_A = const$.

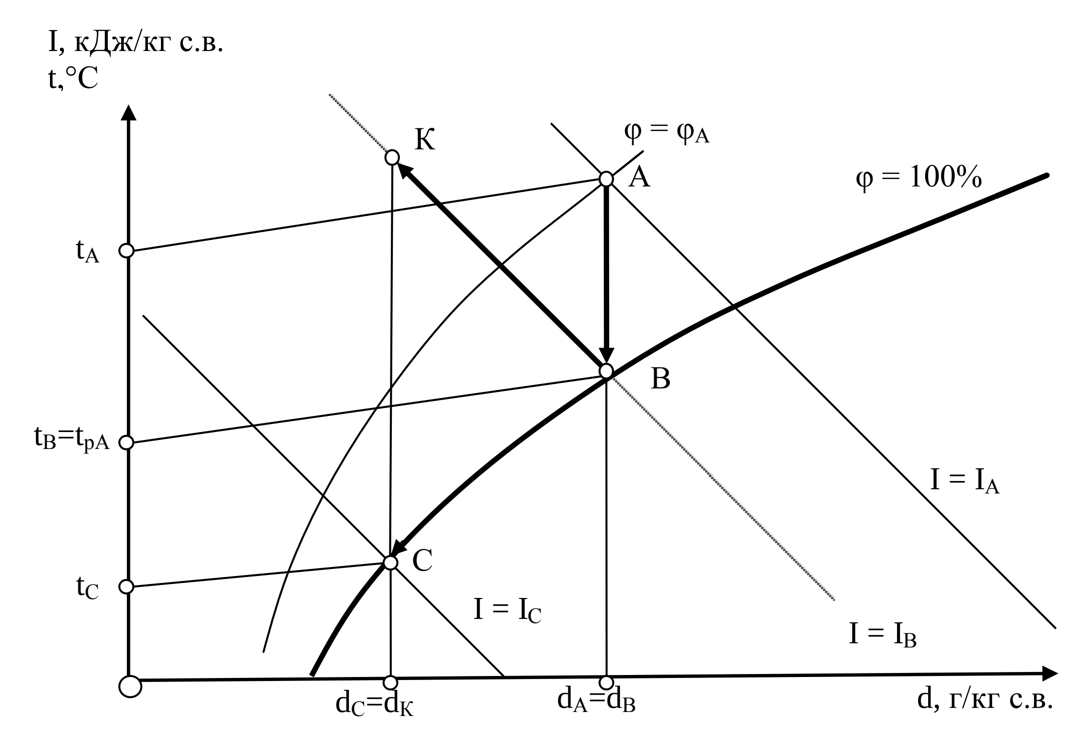


Рис. 1. Процессы конденсации и адсорбции водяных паров из воздуха:
АВ — процесс охлаждения воздуха без конденсации паров;
ВС — процесс охлаждения воздуха с конденсацией водяных паров;
ВК — процесс адсорбции водяных паров при постоянной энтальпии

Процесс конденсации водяных паров при охлаждении воздуха начинается в точке В, проходит по линии φ = 100 % и заканчивается в точке С, положение которой определяется по задаваемой конечной температуре осушки t_C (температуре точки росы). Этой температуре точки росы соответствует линия постоянного влагосодержания воздуха $d_K = d_C = const$ также и в конечной точке К процесса осушки адсорбционным способом. Температура точки росы в данном случае определяется из необходимости обеспечения безопасных микроклиматических условий труда путем предотвращения возникновения такого опасного производственного фактора, как выпадение конденсата. Поэтому температура точки росы воздуха после осушения должна быть ниже возможных температур поверхностей, выпадение конденсата на которых является опасным.

Положение точки К определяется пересечением линии постоянной энтальпии $I_B = const$ и линии $d_C = const$. Для примера в таблице 1 приведены значения параметров воздуха в рассмотренных точках, определенные с помощью электронной Id-диаграммы.

Таблица 1

Параметры воздуха в характерных точках процессов

Параметр		Размерность	А	В	С	К
Температура	t	°С	35	26	–15	77
Отн. влажность	φ	%	60	100	100	≈0
Влагосодержание	d	г/кг с.в.	21,4	21,4	1,0	1,0
Температура т.р.	t_p	°С	26	26	–15	–15
Энтальпия	I	кДж/ кг с.в.	90,4	80,8	–12,6	80,8

Количество теплоты Q_x, кДж, отводимой холодильной установкой от воздуха, для реализации процессов охлаждения и конденсации водяных паров с их последующей кристаллизацией на охлаждающей поверхности, определяется по формуле

$$Q_x = m(I_A - I_C) + \lambda m(d_A - d_C)/1000. \quad (2)$$

где m — масса сухой части охлаждаемого воздуха, кг с.в.; λ — теплота кристаллизации конденсата, кДж/кг, для воды λ = 335 кДж/кг.

В формуле (2) и в других формулах, где используется влагосодержание *d,* используется переводной коэффициент «1000», с помощью которого размерность г/кг с.в. приводится к размерности кг/кг с.в.

Минимально необходимые затраты энергии на работу компрессора холодильной установки $L_к$, кДж, пропорциональны количеству отводимой от воздуха теплоты Q_x и зависят от величины холодильного коэффициента ε_x, определяемого термодинамическим циклом холодильной установки:

$$L_к = Q_x/\varepsilon_x. \qquad (3)$$

Для осуществления непрерывности процесса осушения необходимо производить оттаивание воздухоохладителей. Поэтому к работе компрессора, определяемой по формуле (3), необходимо добавить затраты на плавление образующегося в воздухоохладителях льда $Q_{пл}$, кДж:

$$Q_{пл} = \lambda m(d_A - d_C)/1000. \qquad (4)$$

Затраты энергии на процесс ВК адсорбции (рис. 1) при постоянной энтальпии равны нулю. Однако для осуществления непрерывности процесса необходима регенерация адсорбента, затраты энергии на которую определяются теплотой $Q_д$, кДж, необходимой для испарения молекул воды, поглощенной адсорбентом:

$$Q_д = rm(d_A - d_C)/1000, \qquad (5)$$

где r — удельная теплота парообразования, кДж/кг.

По справочным данным при температуре 200°С удельная теплота парообразования r =1940 кДж/кг, при температуре 300°С — r =1400 кДж/кг.

Для осуществления процесса десорбции воды из адсорбента с сухой массой m_a необходимым условием является его нагревание (для силикагеля обычно до температуры t_a = 300°С). Затраты энергии на этот процесс $Q_н$ составят:

$$Q_н = [c_a m_a + c_в m(d_A - d_C)/1000]t_a, \qquad (6)$$

где c_a — теплоемкость адсорбента, кДж/(кг·К); $c_в$ — теплоемкость воды, кДж/(кг·К).

Для силикагеля, по справочным данным, c_a = 0,92 кДж/(кг·К), для воды принимаем $c_в$ = 4,2 кДж/(кг·К).

Минимально возможную массу адсорбента m_a, которую необходимо нагревать для осуществления процесса десорбции, можно оценить по его адсорбционной способности. Для силикагеля адсорбционная способность существенно зависит от нескольких факторов: скорости воздушного потока, давления, структуры и величины гранул, температуры регенерации и др. Адсорбционная способность показывает, какое количество паров может поглотить адсорбент единичной массы или объема. Более высокие значения соответствуют низким скоростям потока воздуха, мелким фракциям и большим температурам регенерации. Примем достаточно высокое значение адсорбционной способности силикагеля γ = 0,05 (или 5 %) по массе [15]. Тогда масса адсорбента, необходимая для адсорбции водяных паров и последующей их десорбции, будет определяться по формуле

$$m_a = m(d_A - d_C)/(1000\cdot\gamma). \qquad (7)$$

Другие затраты при данном способе осушки отсутствуют. Тогда энергетическую эффективность *Э* данных двух способов можно оценить, поделив суммарные энергетические затраты конденсационного способа на затраты, необходимые для адсорбционного способа:

$$Э = (L_к + Q_{пл})/(Q_д + Q_н). \qquad (8)$$

Подставляя в эту формулу выражения из формул (2–7), после преобразований получим:

$$Э = \frac{1}{r + (c_в + c_a/\gamma)t_a}\left[\frac{1000(I_A - I_C)}{(d_A - d_C)\varepsilon_x} + \lambda(1 + \frac{1}{\varepsilon_x})\right]. \qquad (9)$$

Если показатель *Э* больше единицы, то конденсационный способ хуже адсорбционного по энергетическим затратам. Если показатель меньше единицы, то конденсационный способ лучше. Прямой анализ формулы (9) не позволяет сделать однозначный вывод об энергетической эффективности того или иного способа осушки воздуха, так как значение предложенного показателя *Э* определяется рядом параметров, величина которых изменяется в достаточно широких диапазонах. К их числу относится температура регенерации силикагеля t_a, его адсорбционная способность *γ,* холодильный коэффициент ε_x, параметры воздуха после осушения в точке С, которые определяются из необходимости обеспечения безопасных микроклиматических условий труда. Поэтому проведем анализ энергетической эффективности по результатам расчетов, используя подходы многофакторного исследования.

Обсуждение. Выполним в качестве примера расчет показателя экономической эффективности по формуле (9) с использованием данных, приведенных в таблице 1.

$$Э = \frac{1}{1400 + (4{,}2 + 0{,}92/0{,}05) \cdot 300}\left[\frac{1000 \cdot (90{,}4 + 12{,}6)}{(21{,}4 - 1{,}0) \cdot 2} + 335 \cdot (1 + \frac{1}{2})\right] = 0{,}37 \cdot$$

Полученный результат показывает, что энергетические затраты адсорбционного способа в данном случае больше затрат конденсационного способа в 2,7 раза. Если холодильный коэффициент ε_x в формуле (9) уменьшится до 1, то затраты конденсационного способа увеличатся, что приведет к увеличению показателя *Э,* который будет равен 0,7. Затраты адсорбционного способа в этом случае также больше затрат конденсационного способа, но только на 40 %. Это объясняется большими удельными затратами энергии на регенерацию силикагеля (на нагрев адсорбента и испарение одного килограмма воды при нормальном атмосферном давлении) $E_{уа}$, кДж/кг. В формуле (9) эти затраты отражает знаменатель первого сомножителя правой части. Проанализируем зависимость этих удельных затрат энергии от температуры регенерации $t_а$ и адсорбционной способности γ силикагеля.

$$E_{уа} = r + (c_в + c_а/\gamma)t_а. \tag{10}$$

Для приведенных выше данных удельные затраты энергии будут равны

$$E_{уа} = 1400 + (4{,}2 + 0{,}92/0{,}05)300 = 8180 \text{ кДж/кг}.$$

Изменение температуры регенерации $t_а$ приводит к нелинейному изменению затрат энергии, так как одновременно изменяется теплота испарения r. Графики изменения удельных затрат энергии на регенерацию при изменении температуры регенерации от 100 до 400°С при различных значениях адсорбционной способности силикагеля показаны на рис. 2.

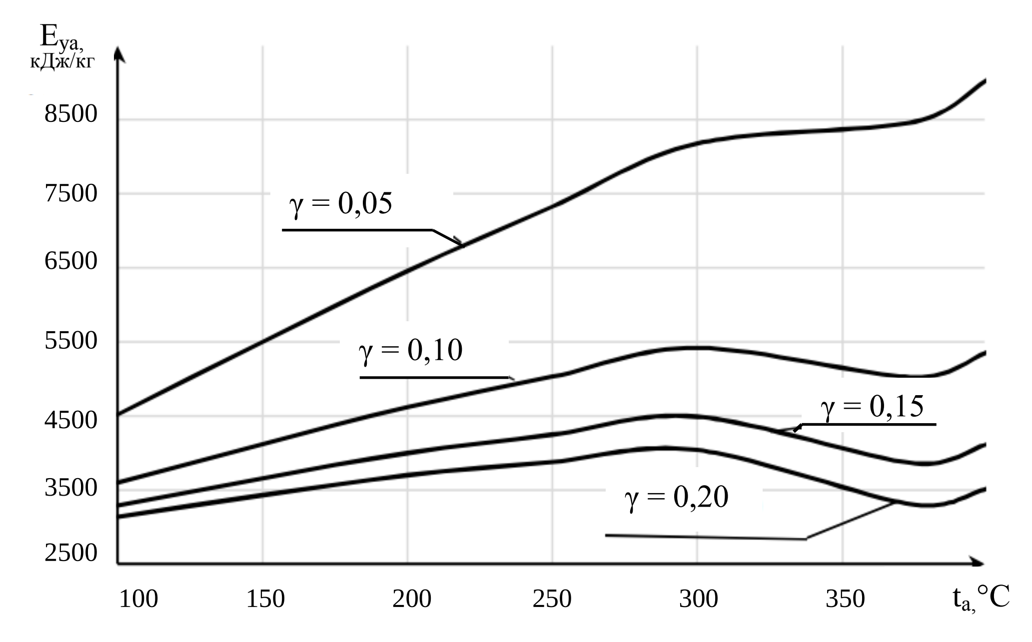


Рис. 2. Зависимость удельных затрат энергии от температуры

Как видно из приведенных графиков, повышение температуры регенерации силикагеля выше 375°С нецелесообразно с точки зрения энергетических затрат. Локальный минимум удельных энергетических затрат в этой области объясняется тем, что при температуре 374,15°С теплота испарения становится равной 0 из-за достижения водой критического состояния.

Более существенным для снижения энергетических затрат является увеличение адсорбционной способности силикагеля γ. В расчетах использовалось значение γ = 0,05, что соответствует среднему значению потоковой или динамической адсорбционной способности силикагеля [15]. Если в расчетах использовать значения статической или равновесной адсорбционной способности силикагеля по воде, которые определяются величиной максимально возможного количества влаги, поглощаемой единицей массы (или объема) адсорбента в статических или равновесных динамических условиях, то удельные энергетические затраты будут существенно ниже. Так, при γ = 0,1 и температуре регенерации $t_а$ = 300°С, величина $E_{уа}$ = 5420 кДж/кг.

Результаты расчетов величины удельных энергетических затрат $E_{уа}$ при разных температурах регенерации и адсорбционной способности силикагеля приведены в таблице 2.

Таблица 2

Энергетические затраты адсорбционного способа $E_{уа}$, кДж/кг

Температура регенерации t_a, ^{0}C	Теплота испарения r, кДж/кг	γ = 0,05	γ = 0,10	γ = 0,15	γ = 0,20
100	2256	4520	3600	3290	3140
150	2112	5500	4120	3660	3432
200	1941	6460	4620	4000	3700
250	1675	7330	5030	4250	3880
300	1404	8180	5420	4490	4040
375	0	8475	5025	3860	3300
400	0	9040	5360	4120	3520

Аналогично проведем анализ удельных энергетических затрат при конденсационном способе осушки $E_{ук}$, кДж/кг, величина которых определяется выражением в квадратных скобках в формуле (9):

$$E_{ук} = \frac{1000(I_A - I_C)}{(d_A - d_C)\varepsilon_x} + \lambda(1 + \frac{1}{\varepsilon_x}) \cdot \qquad (11)$$

Для приведенных в таблице 1 параметров воздуха величина $E_{ук}$ будет равна:

$$E_{ук} = \frac{1000 \cdot (90{,}4 + 12{,}6)}{(21{,}4 - 1{,}0) \cdot 2} + 335 \cdot (1 + \frac{1}{2}) = 3030 \text{ кДж/кг.}$$

Данная величина показывает минимально необходимые затраты энергии на «удаление» из воздуха 1 кг водяных паров. Как видно, полученное значение меньше всех величин, приведенных в таблице 2. Следовательно, можно сделать вывод, что конденсационный способ по энергетическим затратам эффективнее адсорбционного способа осушки. Однако для подтверждения этого вывода необходимо проанализировать, как меняются удельные энергетические затраты $E_{ук}$ при изменении начальных и конечных состояний воздуха в процессе осушения. Этим состояниям на Id-диаграмме соответствуют точки А и С (рис. 1). Положение точки А задается двумя параметрами (например, температурой и относительной влажностью). Положение точки С определяется одним параметром (как правило, температурой точки росы). Положение этой точки определяется исходя из необходимости обеспечения безопасных микроклиматических условий труда. Первоначально проанализируем влияние первых двух параметров на величину $E_{ук}$, т.е. температуру точки С примем равной – 15°С.

Диапазон изменения температуры воздуха примем от 10 до 50°С, относительной влажности — от 30 до 90 %. Для определения параметров воздуха в точке А (влагосодержание и энтальпия) использовалась электронная Id-диаграмма. Полученные результаты сведены в таблицу 3. Там же приведены искомые значения удельных энергетических затрат конденсационного способа, определяемые по формуле (11).

Анализ полученных результатов, приведенных в таблицах 2 и 3, показывает, что при некоторых условиях осушение воздуха адсорбционным способом становится энергетически выгоднее конденсационного способа. Здесь следует отметить, что данные в таблице 2 определяются режимами регенерации адсорбента и, следовательно, могут быть выбраны или назначены исходя из технологических и конструктивных особенностей реализации данного способа. Например, повышение энергетической эффективности адсорбционного способа при низких температурах регенерации адсорбента входит в противоречие с необходимостью сокращения длительности данного процесса.

Таблица 3

Энергетические затраты конденсационного способа $E_{ук}$, кДж/кг

Температура воздуха t_A, ^{0}C	Параметры	φ = 30 %	φ = 50 %	φ = 70 %	φ = 90 %
20	d_A, г/кг с.в.	4,3	7,3	10,2	13,2
	I_A, кДж/кг с.в.	31,2	38,6	46,1	53,7
	$E_{ук}$, кДж/кг	7140	4570	3690	3220
30	d_A, г/кг с.в.	7,9	13,3	18,8	24,4
	I_A, кДж/кг с.в.	50,6	64,3	78,4	92,6
	$E_{ук}$, кДж/кг	4580	3630	3060	2750
40	d_A, г/кг с.в.	13,9	23,5	33,4	43,6
	I_A, кДж/кг с.в.	76,2	101,0	126,5	152,8
	$E_{ук}$, кДж/кг	3940	3030	2650	2440
50	d_A, г/кг с.в.	23,6	40,3	58,0	76,6
	I_A, кДж/кг с.в.	111,7	155,1	200,9	249,1
	$E_{ук}$, кДж/кг	3250	2640	2370	2230

Высокие значения адсорбционной способности достигаются только при длительном контакте адсорбента с осушаемым воздухом, что приводит к низкой производительности осушителей по воздуху. Поэтому, учитывая данные ограничения, в качестве предельного (минимального) значения удельных энергетических затрат конденсационного способа можно выбрать значение $E_{уа}$ = 4600 кДж/кг. В таблице 2 этот режим обозначен зеленым цветом.

Данные в таблице 3 определяются исходными параметрами воздуха перед процессом осушки, которые, в случае использования наружного воздуха, определяются климатическими и погодными условиями. В случае использования внутреннего воздуха — параметрами воздуха внутри помещения. Как видно, только одно значение удельных энергетических затрат, выделенное желтым цветом, превышает выбранное для сравнения значение из таблицы 2. Это значение соответствует низкой относительной влажности и температуре. Данный факт объясняется тем, что в этом случае значительная часть энергии тратится на охлаждение воздуха без конденсации водяных паров. На рис. 1 этот процесс изображен отрезком АВ.

Далее рассмотрим влияние температуры точки росы в начале и конце процесса осушки на энергетическую эффективность конденсационного способа. Для исключения влияния потерь энергии на реализацию процесса охлаждения воздуха без конденсации будем считать, что воздух перед началом осушки имеет относительную влажность φ = 100 %. Результаты расчетов приведены в таблице 4. Анализ полученных данных показывает, что увеличение степени осушки воздуха, характеризуемой температурой точки росы на выходе из осушителя, приводит к возрастанию удельных энергетических затрат. Следовательно, для обеспечения более жестких требований к безопасности микроклиматических условий труда необходимы большие энергетические затраты. При осушении воздуха, уже имеющего низкую температуру точки росы (менее 5°С), использование конденсационного способа осушки становится энергетически менее выгодным, чем адсорбционного, если для сравнения использовать удельные энергетические затраты на регенерацию силикагеля, равные 4600 кДж/кг (таблица 2). В таблице 4 удельные энергетические затраты, не превышающие 4600 кДж/кг выделены зеленым цветом.

Таблица 4

Энергетические затраты $E_{ук}$, кДж/кг, при разной степени осушки

	Параметры		t_{pA} = 0°C	t_{pA} = 5°C	t_{pA} = 10°C	t_{pA} = 15°C
t_{pC},°C	d_A, г/кг с.в.		3,8	5,4	7,6	10,6
	I_A, кДж/кг с.в.		9,4	18,6	29,3	42,1
–10	d_C, г/кг с.в.	1,6	4030	3750	3450	3180
	I_C, кДж/кг с.в.	–6,1				
–15	d_C, г/кг с.в.	1,0	4430	4050	3680	3350
	I_C, кДж/кг с.в.	–12,6				
–20	d_C, г/кг с.в.	0,6	4880	4380	3920	3540
	I_C, кДж/кг с.в.	–18,6				
–25	d_C, г/кг с.в.	0,4	5460	4790	4220	3760
	I_C, кДж/кг с.в.	–24,3				

Выводы. Рассмотренные результаты исследования показывают, что конденсационный способ по энергетическим затратам превосходит адсорбционный способ осушения воздуха в большинстве расчетных случаев (иногда в несколько раз) при обеспечении безопасных микроклиматических условий труда. Однако при необходимости глубокого осушения уже достаточно сухого воздуха с температурой точки росы на входе в осушитель менее 5°C. В этом случае энергетически более выгодными становятся адсорбционные осушители. Это позволяет сделать вывод, что при построении комбинированных способов осушения первоначально целесообразно использовать конденсационный способ осушения до температуры точки росы 5°C, а далее адсорбционный — до требуемой температуры точки росы, определяющей безопасные микроклиматические условия труда внутри помещения.

При необходимости получения не только сухого, но и охлажденного до низких температур воздуха, который предотвращают появление опасных производственных факторов, связанных с недопустимым повышение температуры (например, в холодильных установках морозильных камер, авторефрижераторов, системах холодоснабжения специальных сооружений и др.), конденсационный способ энергетически является самым выгодным.

Библиографический список

1. Панфилов, А. В. Рекомендательные системы безопасности для риск-ориентированного подхода / А. В. Панфилов, В. В. Дерюшев, А. А. Короткий // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 5. — С. 48–55.

2. The quality analysis of the anti-corrosion coatings metal structures operating in difficult conditions / V. V. Deryushev, M. M. Zaitseva, E. E. Kosenko, V. V. Kosenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 913 (4). — Art. 042059. http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/913/4/042059

3. Synthesis of methods and principles of ensuring the reliability of one-off and serial production machines / V. E. Kasyanov, V. V. Deryushev, E. E. Kosenko [et al.] // MATEC Web of Conferences : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018). — 2018. — Vol. 224. — Art. 02106. https://doi.org/10.1051/matecconf/201822402106

4. Мирончук, Ю. А. Влияние эксплуатационных влагопритоков на тепловлажностные процессы в камерах хранения мороженых продуктов / Ю. А. Мирончук // Вестник Международной академии холода. — 2014. — № 2. — С. 30–33.

5. Вишневский, Е. П. Осушение воздуха как метод защиты зданий от разрушения / Е. П. Вишневский, М. Ю. Салин // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. — 2013. — № 5 (137). — С. 86–93.

6. Вишневский, Е. П. Необходимость осушения воздуха и оценка профицита влаги / Е. П. Вишневский, Г. В. Чепурин // Сантехника. Отопление, Кондиционирование. — 2010. — № 4 (100). — С. 72–77.

7. Хмельнюк, М. Г. Современные технологии осушения воздуха / М. Г. Хмельнюк, Д. И. Важинский, Н. В. Жихарева // Холодильная техника и технология. — 2014. — Т. 50, № 3. — С. 15–21.

8. Гусева, Я. Э. Энергоэффективность в системах кондиционирования воздуха с применением испарительного охлаждения / Я. Э. Гусева, Н. А. Королёва // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. — 2018. — № 8 (200). — С. 74–77.

9. Наумов, А. А. Выбор энергоэффективных систем кондиционирования воздуха офисных зданий / А. А. Наумов // АВОК. — 2005. — № 5. — С. 20–24.

10. Николаев, А. В. Энергоэффективное кондиционирование шахтного воздуха в неглубоких рудниках / А. В. Николаев // Горный журнал. — 2017. — № 3. — С. 71–74.

11. Меркулов, В. И. Энтропийно-статистический анализ цикла системы кондиционирования воздуха самолета / В. И. Меркулов, И. В. Тищенко, С. А. Абалакин // Известия МГТУ МАМИ. — 2020. — № 3 (45). — С. 29–35.

12. Ляльков, М. В. Анализ энергоэффективности осушения сжатого воздуха по комбинированной схеме / М. В. Ляльков // Теория и практика современной науки. — 2017. — № 6 (24). — С. 513–521.

13. Богословский, В. Н. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение / В. Н. Богословский, О. Я. Кокорин, Л. В.Петров. — Москва: Стройиздат, 1985. — 367 с.

14. Кельцев, Н. В. Основы адсорбционной техники / Н. В. Кельцев. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Химия, 1984. — 592 с.

15. Аверкин, А. Г. I-d-диаграмма влажного воздуха и ее применение при проектировании технических устройств / А. Г. Аверкин. — Санкт-Петербург: Лань, 2016. — 192 с.

Об авторах:

Дерюшев Виктор Владимирович, главный научный сотрудник, профессор кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистики» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1812-2834, deryushevv@mail.ru

Косенко Евгений Евгеньевич, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистики» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0515-9849, A123lok@mail.ru

Косенко Вера Викторовна, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистики» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3312-2771, kosenko_verav@mail.ru

Кривчук Михаил Андреевич, студент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистики» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5612-2777, krivchuk.mikhail@gmail.com

Дерюшев Илья Викторович, курсовой офицер – преподаватель Военной академии РВСН имени Петра Великого (Филиал г. Серпухов) (142210, РФ, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, 17), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3614-0668, derushev.i.v@mail.ru

Тимофеев Алексей Серафимович, доцент кафедры «Технология машиностроения» Технологического института (филиал) ДГТУ в г. Азове (346780, РФ, Ростовская обл. г. Азов, ул. Промышленная, 1), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6367-4027, Timalser65@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. В. Дерюшев — постановка проблемы, разработка концепции статьи. Е. Е. Косенко — описание результатов и формирование выводов исследования; В. В. Косенко — критический анализ литературы. М. А. Кривчук — табличное представление результатов. И. В. Дерюшев — сбор статистических данных. А. С. Тимофеев — графическое представление результатов.

About the Authors:

Deryushev, Viktor V., Chief researcher, Professor, Department of Operation of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Dr.Sci., Professor, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1812-2834, deryushevv@mail.ru

Kosenko, Evgeniy E., Associate professor, Department of Operation of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Cand.Sci., Associate professor, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0515-9849, A123lok@mail.ru

Kosenko, Vera V., Associate professor, Department of Operation of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Cand.Sci., ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3312-2771, kosenko_verav@mail.ru

Krivchuk, Mikhail A., Student, Department of Operation of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5612-2777, krivchuk.mikhail@gmail.com

Deryushev, Ilya V., Course officer –teacher, Military Academy of the Peter the Great Strategic Missile Forces (Serpukhov Branch) (17, Brigadnaya str., Serpukhov, Moscow region, 142210, RF), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3614-0668, derushev.i.v@mail.ru

Timofeev, Aleksey S., Associate professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Technological Institute (branch) of DSTU in Azov (1, Promyshlennaya str., Azov, Rostov region, 346780, RF), Cand.Sci., ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6367-4027, Timalser65@mail.ru

Contribution of the authors:

V. V. Deryushev — statement of the problem, development of the concept of the article. E. E. Kosenko — description of the results and formulation of the conclusions of the research; V. V. Kosenko — critical analysis of the literature. M. A. Krivchuk — tabular representation of the results. I. V. Deryushev — collection of statistical data. A. S. Timofeev — graphical representation of the results.